

EFFECTO DEL MÉTODO DE CORTE SOBRE EL COMPORTAMIENTO A FATIGA DE UN ACERO ESTRUCTURAL DE ALTA RESISTENCIA S690Q

T. García^{1,*}, S. Cicero¹, J. A. Álvarez¹, A. Bannister², A. Martín-Meizoso³, J. Aldazabal³, A. Klimpel⁴

¹ Dpto. Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, Universidad de Cantabria,
Av/ Los Castros s/n, 39005, Santander, Cantabria, España.

* E-mail: garciapt@unican.es

² Tata Steel, Swinden technology Centre, Moorgate, Rotherham, S60 3AR, Reino Unido

³ Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Guipúzcoa (CEIT),
C/ Manuel de Lardizábal, 15, 20018, San Sebastián, España.

³ Politechnika Slaska - Sutil, Akademia 2^a, 44-100 Gliwice, Polonia

RESUMEN

Este artículo estudia el efecto de los diferentes métodos de corte térmico en la vida a fatiga de un acero estructural de alta resistencia S690Q. Se han seleccionado tres sistemas de corte térmico mecanizado ampliamente utilizados en la industria (oxicorte, corte por plasma y corte por láser) y dos detalles estructurales: bordes rectos cortados térmicamente y orificios obtenidos mediante corte térmico para su posterior empleo en uniones atornilladas. El programa experimental está constituido por 60 probetas, las cuales se han llevado a rotura por fatiga en una máquina de resonancia. El valor de la relación de tensiones (R) seleccionado es igual a 0.1. Por cada combinación de método de corte y detalle estructural se ha obtenido su correspondiente curva S-N y límite de fatiga. Se ha llevado a cabo un análisis de la rugosidad superficial y dureza de la Zona Afectada Térmicamente con objeto de determinar la influencia de los métodos de corte térmico en la vida en fatiga. Los resultados obtenidos se comparan con los valores de diseño propuestos por las normativas de diseño en fatiga, evaluando la posibilidad de extrapolar sus curvas S-N tanto a bordes rectos como agujeros cortados mediante cualquiera de los tres sistemas de corte térmico.

PALABRAS CLAVE: fatiga, oxicorte, plasma, láser, S690Q.

ABSTRACT

This paper analyses the effect of different cutting methods on the fatigue life of high strength steel S690Q. The research covers three cutting methods (oxy-fuel, plasma and laser) and two specimen geometries: plain specimens with rectangular sections and cut edges, and specimens with machined edges and a cut hole in the middle section. All the specimens were conducted to failure by applying fatigue cycles, the stress ratio (R) being 0.1, and the corresponding S-N curves were obtained for each combination of cutting method and specimen geometry. Measurements of roughness and hardness have been performed in order to explain the influence of the cutting method on the fatigue life of this particular steel. Fatigue results have been compared with the predictions provided by current fatigue standards, analysing the possibility of extrapolating their S-N curves, focused on oxy-fuel cuts, to plasma and laser cuts.

KEYWORDS: fatigue, oxy-fuel cutting, plasma cutting, laser cutting, S690Q.

1. INTRODUCCIÓN

Desde que una pieza de acero sale del tren de laminación hasta que se dispone en su ubicación definitiva formando parte de una estructura es necesario llevar a cabo una serie de procesos de transformación intermedios que permitan alcanzar los requerimientos exigidos. El corte se incluye dentro de las primeras operaciones que es necesario aplicar al acero laminado y

tiene por objeto obtener piezas con la geometría deseada.

Los procesos de corte térmico constituyen la tecnología más extendida para la fabricación de componentes demandados por numerosos sectores, que incluyen entre otros la construcción de puentes y estructuras metálicas, industria naval, maquinaria de construcción y la industria del automóvil.

El oxicrote es el sistema de corte térmico tradicional, sin embargo en la actualidad el corte por plasma y el corte por láser presentan una amplia implantación en el ámbito industrial, y se han constituido como alternativas tecnológicas tanto por su calidad de corte y precisión como por su mayor productividad y flexibilidad. A pesar de estas ventajas, los fabricantes ven limitada su aplicación en muchos casos en tanto que las normativas de diseño presentan cierta obsolescencia, ya que definen criterios referidos exclusivamente a bordes oxicrotados (ej., la BS7608 [1] o el Eurocódigo 3 [2]) o en algunos casos los requerimientos se extrapolan directamente a bordes cortados por plasma y por láser, siendo necesario el mecanizado de las superficies cuando no es posible el cumplimiento de los mismos (con el sobre coste que ello conlleva).

En lo que respecta a los orificios de las uniones atornilladas, las normativas de fabricación únicamente permiten la obtención de los mismos mediante taladrado o punzonado. Por ejemplo, la Specification for Structural Joints Using High-Strength Bolts [3] establece que los agujeros cortados térmicamente pueden ser utilizados en estructuras sometidas a cargas estáticas, y en caso de cargas dinámicas el ingeniero responsable será el que dictamine sobre su posible adopción. Sin embargo, muchos fabricantes optan por no ejercer esta posibilidad dada la escasa disponibilidad de estudios que avalen el empleo de agujeros cortados térmicamente en condiciones de sollicitación dinámica.

Con todo ello, en este artículo se va a comparar el comportamiento a fatiga de los tres procesos de corte térmico tanto en bordes rectos como en agujeros. Así mismo, se va a evaluar la posibilidad de extrapolar las curvas S-N definidas por las normativas actuales a bordes rectos cortados por plasma y láser, y a agujeros cortados térmicamente.

2. MATERIAL

Con objeto de completar una investigación llevada a cabo recientemente en un acero S355M [4] (laminado termomecánicamente), se ha seleccionado un acero estructural S690Q (en condiciones de temple y revenido). La elección de este acero y el espesor de las chapas en las que ha sido suministrado (15 mm) se debe a su empleo generalizado en componentes de puentes, de estructuras offshore o de maquinaria de construcción sometidos a importantes cargas dinámicas.

La microestructura del acero es bainítica/martensítica (Figura 1). Mediante la técnica de difracción de electrones retrodispersados (EBSD) se ha obtenido un tamaño de grano efectivo de $2.34\ \mu\text{m}$ y $2.83\ \mu\text{m}$ según dos ángulos de medida, 3° y 12° , respectivamente.

En la Tabla 1 se recoge la composición química del acero así como sus principales propiedades mecánicas.

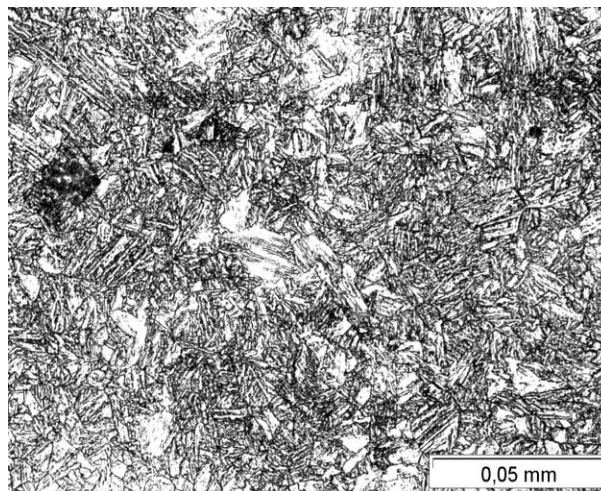


Fig. 1. Microestructura del acero S690Q.

Tabla 1. Composición química del acero S690Q.

COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)				
C	Si	Mn	P	S
0.15	0.40	1.42	0.005	0.001
Cr	Mo	Ni	Al	Cu
0.02	0.002	0.16	0.048	0.01
Nb	N	Sn	Ti	V
0.029	0.006	0.002	0.003	0.058
PROPIEDADES MECÁNICAS				
Módulo de Elasticidad (GPa)	Límite Elástico (MPa)		Tensión de Rotura (MPa)	
209.4	776.2		833.7	

3. PROCESOS DE CORTE

Para poder realizar un estudio comparativo completo, se han adoptado las tres alternativas de corte térmico empleadas en la actualidad. Con objeto de que la calidad del corte fuese lo más representativa de la realidad, las probetas fueron fabricadas con los parámetros de corte normalmente adoptados por la industria para el acero y espesor considerados, los cuales coinciden con los recogidos en [4].

Conviene señalar que en el corte por plasma se ha seleccionado oxígeno y aire como gas plasma y gas de protección, respectivamente. Así mismo, en el corte por láser se ha adoptado oxígeno como gas auxiliar. Esta elección es muy común en el corte de aceros al carbono en tanto que el calor generado por la reacción de oxidación permite incrementar la velocidad de corte en un 25%.

En lo que respecta a la velocidad de corte, los valores obtenidos tanto en el corte por plasma (2.2 m/min) como en el corte por láser (1 m/min) son considerablemente más elevados a los proporcionados por el oxicrote (0.5 m/min).

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Como parámetros comparativos de la vida a fatiga se han seleccionado tanto las curvas S-N como el valor del límite de fatiga. Cumpliendo con las especificaciones de la ASTM E739 [5], por cada curva S-N se han empleado 10 probetas. Así mismo, se han seleccionado dos geometrías distintas. Por un lado, para reproducir las condiciones en superficies de corte rectas, se ha adoptado una de las tipologías recogidas en la normativa ASTM E466 [6], Figura 2, con el corte objeto de evaluación paralelo a la dirección de laminación. Por otro lado, para simular la presencia de agujeros en componentes, se ha diseñado una probeta con un agujero en el centro, Figura 3; dada la ausencia de este tipo de probetas en la normativa actual, ha sido necesario recurrir a otros diseños propuestos en la bibliografía [7]. Del mismo modo, las probetas con agujero han sido obtenidas en la dirección de laminación. Conviene señalar que, para la fabricación de las mismas, se ha tomado la precaución de adoptar el centro del orificio como punto inicial del corte y uno de los dos extremos del diámetro paralelo a la dirección de aplicación de las cargas como punto final.

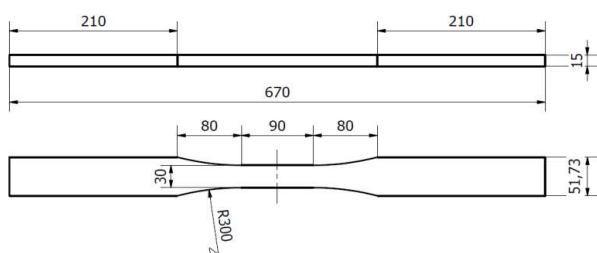


Fig. 2. Esquema de la geometría de las probetas con borde recto (cotas en mm).

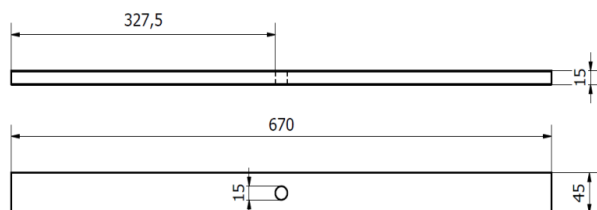


Fig. 3. Esquema de la geometría de las probetas con agujero (cotas en mm).

Los ensayos de fatiga han sido realizados con una máquina de alta frecuencia de 400KN de capacidad, la cual permite llevar a cabo los ensayos a la frecuencia de resonancia de la probeta, que para las dos tipologías empleadas oscila entre 77 y 79 Hz. Respecto a la relación de cargas, se ha seleccionado un valor de $R=0.1$, siendo este el más empleado en la bibliografía (ej., [8]) y constituyendo una solución de compromiso para la evaluación de este tipo de componentes tanto en puentes como en maquinaria de construcción. Finalmente, se ha considerado como límite de fatiga

($\Delta\sigma_{\text{run-out}}$) a aquel valor del rango de tensiones para el cual dos probetas no han roto al haber alcanzado 10^7 ciclos.

5. CARACTERIZACIÓN DE LOS BORDES DE CORTE

En la Figura 4 se muestra la apariencia típica de los bordes obtenidos tras un proceso de corte térmico. Se puede observar como en los bordes oxicortados se produce una acumulación de metal fundido en el borde inferior, el cual se caracteriza por una serie de depósitos alargados y transversales a dicho borde. Los bordes cortados por plasma presentan la superficie de mejor calidad y sin apenas defectos. En el caso de los bordes cortados por láser es necesario destacar que en las superficies resultantes se observa la presencia de irregularidades lenticulares repartidas en la longitud de corte. Según se apunta en [9], el origen de estos defectos viene determinado por una velocidad de corte inferior a la óptima, acrecentándose esta problemática cuanto menor sea la velocidad adoptada.

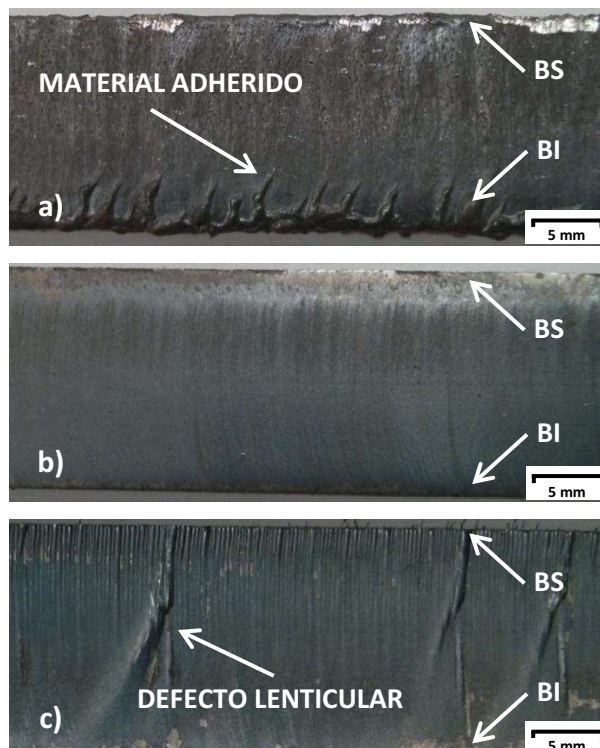


Fig. 4. Superficies cortadas térmicamente. a) Oxicorte; b) Plasma; c) Láser. BS: Borde superior; BI: Borde inferior.

En la Figura 5 se comparan los valores de dureza máxima medidos en la Zona Afecta Térmicamente (ZAT) correspondientes a los tres procesos de corte térmico y el límite definido dos normativas representativas de USA (Alberta Specification for Bridge Construction [10]) y de EU (EN 1090 [11]). Se comprueba que el valor obtenidos para los tres procesos es igual o ligeramente inferior al propuesto en [11]. Sin

embargo ninguno de ellos cumple con el valor de dureza requerido por [10], el cual puede ser excesivamente conservador.

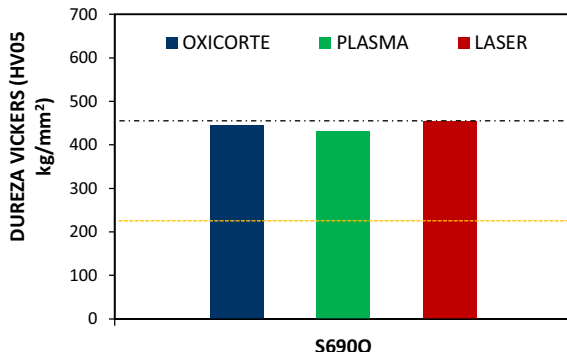


Fig. 5. Dureza máxima en la ZAT.

Una vez que los bordes de corte recto han sido analizados, se va a proceder a evaluar la calidad de la superficie correspondiente a los agujeros cortados térmicamente.

En primer lugar, teniendo en cuenta que las estrías generadas por los procesos de corte térmico son verticales, la medida de la rugosidad debería realizarse en una determinada circunferencia del orificio, lo cual no es posible de llevar a cabo mediante un rugosímetro en tanto que este solo es capaz de medir la rugosidad según una línea recta. Dada la imposibilidad de medida de la rugosidad en los agujeros cortados térmicamente según lo exigido en la normativa [11], se han tomado imágenes de la superficie obtenida en el contorno del orificio para poder evaluar y comparar cualitativamente los tres procedimientos de corte térmico seleccionados (Figura 6).

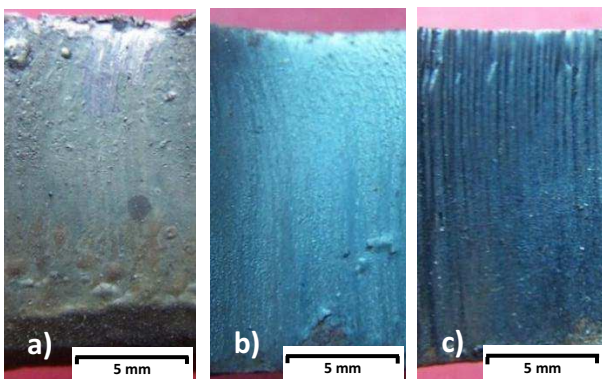


Fig. 6. Superficies de agujeros cortados térmicamente.
a) Oxicorte; b) Plasma; c) Láser.

Como se puede comprobar en la Figura 6b, el corte por plasma muestra una superficie sin la presencia de defectos y con unas estrías apenas visibles. El oxicorte (Figura 6a) también se caracteriza por una superficie de elevada calidad. Sin embargo, a diferencia de la obtenida mediante corte por plasma, en la superficie oxicortada se observan restos de material fundido que no se han expulsado correctamente. El corte por láser es

el que presenta aparentemente una superficie de peor calidad, con estrías verticales claramente visibles en las proximidades del borde superior

6. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO A FATIGA DE LAS PROBETAS CON BORDE RECTO

En la Figura 7 se representan los resultados experimentales correspondientes a las probetas de borde recto así como la curva S-N media estimada para cada uno de los procesos de corte.

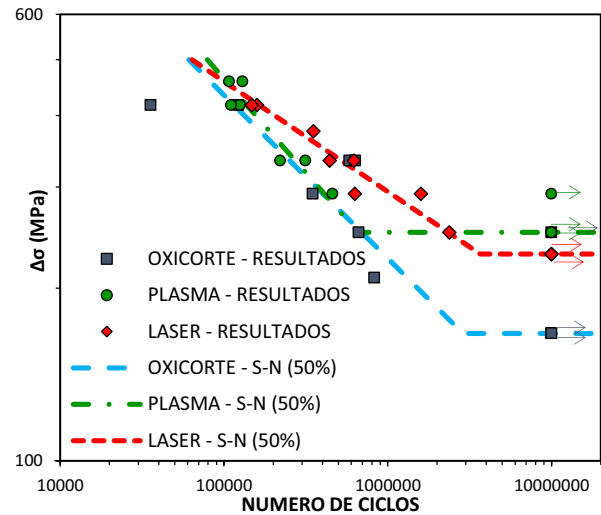


Fig. 7. Curvas S-N (50%) para las probetas con borde de corte recto.

Siguiendo las recomendaciones de Schneider y Maddox [12], el intercepto ($\log A_{\text{mean}}$) y la pendiente (m) de la curva S-N media se han estimado por mínimos cuadrados a partir de los resultados correspondientes a las probetas que han roto. Los parámetros de ajuste se recogen en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de ajuste de la curva S-N.

	$\log A_{\text{mean}}$	m	$\Delta\sigma_{\text{run-out}}$
OXICORTE	14.25	3.51	166 MPa
PLASMA	13.14	3.05	250 MPa
LASER	18.82	5.19	229 MPa

En primer lugar se observa que el corte por láser proporciona la mayor resistencia a fatiga en el rango de vida finita. Sin embargo esta mejora desaparece conforme el rango de tensiones aumenta. Así mismo, el comportamiento a fatiga del corte por plasma es muy similar al del oxicorte.

En lo que respecta al valor del límite de fatiga, los resultados obtenidos son diferentes a los observados en el rango de vida finita. Se comprueba como el oxicorte provoca una reducción en el límite de fatiga de 84 MPa y 63 MPa respecto al obtenido en el corte por plasma y el corte por láser, respectivamente.

Las condiciones superficiales mostradas en la Figura 4 parecen presentar cierta correlación con los resultados obtenidos en el rango de vida a fatiga infinita. El material fundido adherido al borde inferior de las superficies oxicortadas provoca una concentración de tensiones (por la forma abrupta que presenta) y una entalla metalúrgica en el material, lo cual parece afectar de forma considerable al valor del límite de fatiga. En el caso de los bordes cortados por láser, los defectos lenticulares, donde se inician la totalidad de las roturas por fatiga, parecen justificar el ligero descenso del límite de fatiga respecto del valor obtenido en los bordes cortados por plasma.

Para poder comparar los resultados obtenidos en el presente programa experimental con los valores recogidos en la normativa actual, se ha seleccionado la normativa BS7608 [1]. Se trata de la normativa de fatiga más actualizada y se emplea en un amplio abanico de sectores industriales. Una de las ventajas de esta normativa es la caracterización de cada categoría de detalle por una curva S-N media y una curva S-N de diseño asociada a una determinada probabilidad de supervivencia.

En la Figura 8 se comparan los resultados experimentales con las categorías de detalle C (asociada a bordes oxicortados) y la B (correspondiente superficies mecanizadas) de la normativa BS7608 [1].

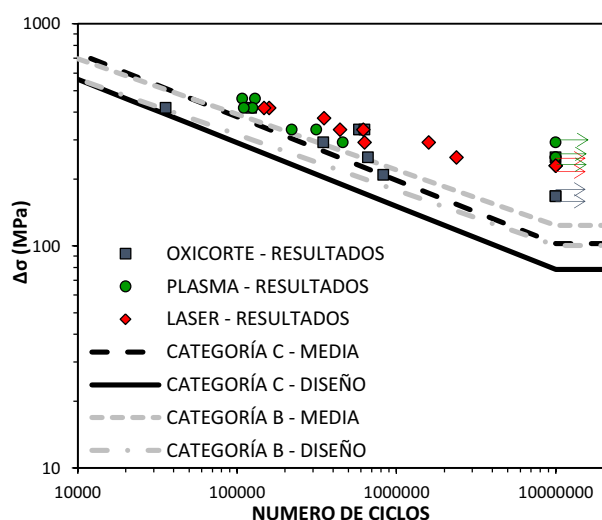


Fig. 8. Comparación de los resultados experimentales con las curvas S-N correspondientes a las categorías B y C de la BS7608 [1].

Analizando la Figura 8 se observa que la mayoría de los resultados experimentales se sitúan por encima de la curva S-N media asociada a la categoría C. Solo un valor (correspondiente al oxicorte) se sitúa por debajo de la curva S-N media y en la zona segura (por encima de la curva S-N de diseño). En lo que respecta a la categoría B, se comprueba que tanto el corte por plasma como el corte por láser proporcionan resultados

conservadores tanto en el rango de vida a fatiga finita e infinita: todos los resultados se sitúan por encima de la curva S-N media. Los valores obtenidos en los bordes oxicortados se localizan próximos a la curva S-N media y generalmente por encima. Por lo tanto, se podría afirmar que la categoría B podría ser empleada en el acero S690Q para bordes rectos cortados mediante cualquiera de los tres procesos de corte térmico.

6. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO A FATIGA DE LAS PROBETAS CON AGUJERO

En la Figura 9 se representan los resultados experimentales correspondientes a las probetas con agujero así como la curva S-N media estimada para cada uno de los procesos de corte.

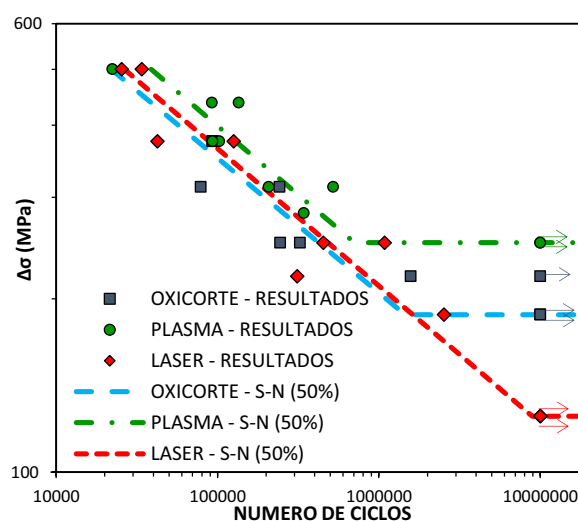


Fig. 9. Curvas S-N (50%) para las probetas con agujero.

Los parámetros de ajuste se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de ajuste de la curva S-N.

	$\log A_{\text{mean}}$	m	$\Delta\sigma_{\text{run-out}}$
OXICORTE	15.89	4.28	187 MPa
PLASMA	15.88	4.18	250 MPa
LASER	15.76	4.20	125 MPa

Como se puede observar en la Figura 9, la resistencia a fatiga en el rango de vida finita de los agujeros obtenidos mediante cualquiera de los tres procesos de corte térmico es muy similar, siendo el de los cortados por plasma ligeramente superior.

En lo que respecta al límite de fatiga, el valor obtenido depende considerablemente del proceso de corte escogido: tanto el oxicorte como el corte por láser muestra una disminución muy significativa del límite de fatiga, provocando una reducción del 25% y 50%, respectivamente, respecto del valor obtenido con el corte por plasma.

La calidad de las superficies mostradas en la Figura 6 podría justificar los resultados obtenidos en relación al límite de fatiga. Los agujeros cortados por plasma, que

presentan una superficie sin estrías visibles (Figura 6b), son los que proporcionan un límite de fatiga más elevado. Por el contrario, los agujeros cortados por láser se caracterizan por una rugosidad muy elevada (Figura 6c), lo cual se traduce en una disminución muy significativa del valor del límite de fatiga. Los agujeros oxicortados también proporcionan una superficie de elevada calidad (Figura 6a), sin embargo, la presencia de material fundido adherido (visible junto al borde inferior) parece favorecer la iniciación de las fisuras.

Finalmente, en la Figura 10 se comparan los resultados experimentales con las curvas S-N correspondientes a la categoría D de la BS7608 [1]. Con ello se pretende comprobar si esta categoría de diseño (propuesta para agujeros taladrados y escariados) puede ser extrapolada a agujeros cortados térmicamente.

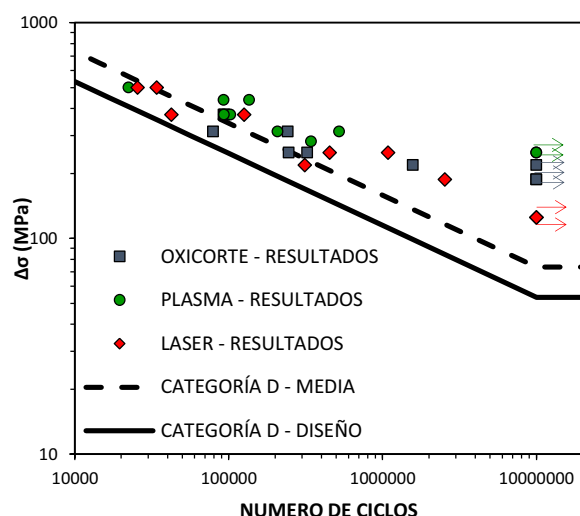


Fig. 10. Comparación de los resultados experimentales con las curvas S-N correspondientes a la categorías D de la BS7608 [1].

Analizando la Figura 10 se observa que la categoría D proporciona resultados de diseño del lado de la seguridad en el rango de vida finita, siendo incluso considerablemente conservadores en el rango de vida infinita, especialmente si el valor del límite de fatiga obtenido en los agujeros cortados por plasma y oxicortados se compara con el propuesto por la normativa BS7608 [1].

7. CONCLUSIONES

En las probetas con borde recto se ha comprobado que tanto el corte por plasma como el corte por láser mejoran el comportamiento a fatiga del oxicorte, especialmente para rangos de tensiones próximos al límite de fatiga. En lo que respecta a las probetas con agujero, los orificios cortados por plasma proporcionan una mayor resistencia a fatiga que los oxicortados y los cortados por láser. Particularmente, estos últimos provocan una reducción muy significativa del valor del límite de fatiga.

En el acero S690Q, la categoría B de la BS7608 [1], de aplicación a bordes rectos mecanizados, podría adoptarse para bordes oxicortados, y sería incluso ligeramente conservadora en bordes rectos cortados por plasma y láser. Finalmente, se ha demostrado que la categoría de detalle propuesta por la BS7608 [1] para agujeros taladrados y escariados (categoría D) podría ser utilizada para agujeros cortados térmicamente en el acero S690Q.

8. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer a la Comisión Europea la financiación del proyecto HIPERCUT: “High Performance Cut Edges in Structural Steel Plates for Demanding Applications”, de cuyos resultados se deriva este artículo.

9. REFERENCIAS

- [1] BS 7608: 2013, Code of practice for fatigue design and assessment of steel structures. BSI. 2013.
- [2] EN 1993-1-9, Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-9: Fatiga. CEN. 2005.
- [3] Specification for structural joints using high-strength bolts. RCSC, Committee A.1. 2009.
- [4] Garcia T., Cicero S., Carrascal I., Alvarez J.A. Estudio del efecto del método de corte sobre la iniciación de fisuras y la vida en fatiga del acero S355M, Anales de Mecánica de la Fractura 31, 453-458.
- [5] ASTM E739-10, Standard practice for statistical analysis of linear or linearized stress-life (S-N) and strain life (ϵ -N) fatigue data. ASTM. 2010.
- [6] ASTM E466-07, Standard practice for conducting force controlled constant amplitude axial fatigue test of metallic materials. ASTM. 2007.
- [7] EUR 22056EN, Performance criteria for cold formed structural steels. 2003.
- [8] Harris I.D. Report 384, Plasma arc cutting of bridge steels. NCHRP. Highway Research Board. 1995.
- [9] Thomas D.J. Characterisation of steel cut edges for improved fatigue property data estimations and enhanced CAE durability. Tesis Doctoral. 2002.
- [10] Standard Specifications for bridge construction, Section 6: Structural Steel. Alberta Transportation. 2013.
- [11] EN 1090-2:2011, Ejecución de estructuras de acero y aluminio. Parte 2: Requisitos técnicos para la ejecución de estructuras de acero. CEN. 2011.
- [12] Schneider C.R.A., Maddox S. J. IIW-XIII-WG1-121r3-06, Guidance for the application of the best practice guide on statistical analysis of fatigue working sheets. TWI. 2006.